

Politiques pro-biocarburants et climatique américaines : impact sur les choix énergétiques du Brésil et des Etats-Unis et bilan carbone.¹

Ujjayant Chakravorty, Marie-Hélène Hubert², Michel Moreaux³

Résumé : Nous analysons l'impact de deux politiques américaines sur la production et les échanges d'éthanol (biocarburants de première génération) et d'éthanol ligno-cellulosique (biocarburant de seconde génération) aux Etats-Unis et au Brésil ainsi que sur les émissions directes et indirectes de carbone. La première politique est une politique dite «pro-biocarburants» qui impose un usage minimal de biocarburants. La deuxième est la politique climatique de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Notre étude montre que la première politique encourage la production massive d'éthanol ligno-cellulosique, la diminution des émissions directes de carbone étant marginale. La deuxième politique accroît le prix des carburants et en décourage la demande. Elle a un effet significatif sur le taux de déforestation au Brésil et augmente de ce fait les émissions indirectes de carbone. La subvention nécessaire à l'implémentation de la politique «pro-biocarburants» devrait être de l'ordre 1.1 US \$ par gallon. Enfin, la taxe sur le carbone dans le secteur des transports aux Etats-Unis devrait être égale à 120 US \$ par tonne équivalent carbone.

Mots-Clés : Politique « pro-biocarburants », Politique Climatique, Usages du Sol, Subvention aux Biocarburants, Taxe sur le Carbone

JEL Codes : Q24, Q41, Q42, Q48.

¹ Nous remercions le Conseil Français de l'Energie pour leur financement et deux rapporteurs anonymes pour leurs remarques qui nous ont permis d'améliorer la version initiale de l'article.

² Chakravorty: Department of Marketing, Business Economics and Law and Department of Economics, University of Alberta, ujjayant@ualberta.ca; Hubert: Department of Marketing, Business Economics and Law and Department of Economics, University of Alberta, mhubert@ualberta.ca;

³ Moreaux: Toulouse School of Economics (LERN, IDEI) mmichel@cict.fr

1. INTRODUCTION

La politique énergétique américaine accorde une place de choix aux biocarburants. Pour des motifs de sécurité énergétique, les Etats-Unis ont mis en place une politique dite «pro-biocarburants». Le « Renewable Fuel Standard » (RFS 2007)⁴ prévoit de porter l'usage des biocarburants de 9 milliards de gallons en 2008 à 36 milliards de gallons en 2022 dont 21 milliards de gallon devraient être des biocarburants de seconde génération (DOE 2008). Par ailleurs pour contribuer à la lutte contre le changement climatique, en mars 2009, des objectifs de réduction des émissions de carbone ont été évoqués sans toutefois qu'ils fassent l'objet d'un engagement ferme. Il a été proposé de réduire les émissions de carbone de 20% en 2020 par rapport à leur niveau de 1990.

Aux Etats-Unis, le secteur des transports est le second secteur émetteur de carbone et contribue à hauteur d'un tiers aux émissions totales (EPA 2009). De ce fait, toute politique de réduction des émissions de gaz à effet de serre a un impact sur le secteur des transports et devrait accélérer le passage d'un carburant fossile à des biocarburants. Alors que de nombreux substituts existent pour le secteur électrique ou résidentiel tels que le solaire ou le nucléaire, les substituts les moins coûteux disponibles au pétrole dans le secteur des transports sont les biocarburants.⁵

Aujourd'hui, les Etats-Unis dominent le marché de l'éthanol : ils sont les premiers consommateurs et les premiers producteurs mondiaux (Elobeid et Tokgoz 2008). Toutefois, le Brésil (deuxième producteur et consommateur mondial)⁶ bénéficie d'avantages comparatifs dans sa production d'éthanol pour trois raisons. Premièrement, produire un gallon d'éthanol au Brésil coûte environ 1.05 US dollars alors que ce coût est de l'ordre de 1.54 US dollars aux Etats-Unis (FAO 2008). Deuxièmement, le Brésil est un pays qui bénéficie de larges étendues de terres

⁴ Une description complète de cette politique est proposée dans le glossaire (appendice C).

⁵ Le GNL et le GPL impliquent un coût de sécurité plutôt dissuasif. Les véhicules doivent faire l'objet d'aménagements coûteux ainsi que le réseau de distribution du produit. Par ailleurs, le stationnement des véhicules au repos obéit à des contraintes beaucoup plus lourdes en termes d'espace très coûteuses en ville.

⁶ Les Etats-Unis et le Brésil fournissent environ 90% de la consommation mondiale (FAO 2008).

actuellement allouées à la forêt ou aux pâturages qui pourraient être mises en culture. Aux Etats-Unis, peu de nouvelles terres sont disponibles (Khanna 2008). Enfin, un gallon d'éthanol produit au Brésil émet 0.4 kilogramme équivalent carbone dans l'atmosphère alors qu'aux Etats-Unis ce même gallon émet 1.7 kilogramme (Ando *et al.* 2009). La présence de barrières aux importations couplées avec une subvention à la production expliquent la dominance des Etats-Unis sur le marché de l'éthanol. Toutefois, l'implémentation de politique sur la consommation de biocarburants pourrait atténuer la domination des Etats-Unis sur le marché de l'éthanol.

On construit un modèle à deux pays : Etats-Unis et Brésil et deux biens : un bien alimentaire et un carburant. Le carburant peut être produit soit à partir d'un mélange de pétrole et d'éthanol (biocarburant de première génération) soit d'éthanol ligno-cellulosique (biocarburant de seconde génération). Le marché du pétrole est un marché mondial dont le fonctionnement est supposé donné. C'est une composante exogène du modèle. A la différence de l'éthanol ligno-cellulosique, la production d'éthanol est en compétition avec la production alimentaire pour l'usage de la terre. Aucune nouvelle terre n'est disponible aux Etats-Unis. Au Brésil, des terres marginales (forêts et pâturages) peuvent être mises en culture. Toutefois, la conversion des terres marginales en terres agricoles induit des rejets de carbone dans l'atmosphère (émissions indirectes). Les Etats-Unis bénéficient d'un avantage comparatif dans la production de biens alimentaires et le Brésil profite d'un avantage comparatif pour la production d'éthanol. Deux politiques américaines sont examinées : une politique « pro-biocarburants » et une politique de réduction des émissions de carbone.

Cette étude se distingue de la littérature existante sur trois points. Premièrement, bien que de nombreuses études aient analysé l'impact des politiques dites « pro-biocarburants » sur le bien-être et sur les émissions de gaz à effet de serre aux Etats-Unis (par exemple de Gorter et Just 2009, Lasco et Khanna 2009), aucune n'a détaillé l'impact de la politique de réduction des émissions de gaz à effet de serre proposée en mars 2009. Deuxièmement, la présente analyse prend en compte les émissions indirectes de carbone au Brésil induites par la politique américaine. Plusieurs études scientifiques ont remis en cause les économies de carbone que permettraient de réaliser la substitution des biocarburants au pétrole lorsque la production des

biocarburants est issue de la déforestation (Fargione *et al.* 2008, Searchinger *et al.* 2008). Enfin, on estime la subvention dont doivent bénéficier les biocarburants pour implémenter la politique «pro-biocarburants» et la taxe sur le carbone qu'implique une politique climatique active.

Le présent article est organisé comme suit. Le modèle théorique est exposé à la section 2. La description du modèle empirique fait l'objet de la section 3. Les résultats sont analysés à la section 4. Nous concluons à la section 5.

2. MODELE

Le modèle est un modèle joint des secteurs agricole et des transports. L'énergie dans le secteur des transports peut être fournie par deux ressources : le pétrole, les biocarburants.⁷ La terre peut être allouée soit à la production d'aliments soit à la production d'énergie.

Hypothèses du modèle.

La terre est disponible en quantité limitée. Elle peut être allouée à deux usages : alimentation ou énergie. On note respectivement L_a et L_e la superficie de terre consacrée à chacun de ces usages. L'équation d'allocation du sol a pour expression :

$$L_a + L_e \leq \bar{L}$$

La productivité de la terre est différente d'un usage à l'autre. k_a et k_e désignent respectivement la quantité de bien alimentaire et celle de biocarburants produite par unité de surface cultivée. Ainsi, $q_a = k_a L_a$ est la production alimentaire totale et $q_e = k_e L_e$ est la production totale de

⁷ Dans le modèle empirique, nous distinguerons les biocarburants de première et de seconde génération étant donné que la politique « pro-biocarburants » impose un niveau minimal de consommation/production de ces biocarburants. Toutefois, distinguer ces deux types de biocarburants aux rendements énergétiques différents ne modifierait pas les résultats du modèle théorique.

biocarburants. On note respectivement c_a et c_e le coût de production d'une unité de bien alimentaire et de biocarburants par unité de surface dédiée.

Le carburant peut être produit à partir de pétrole ou des biocarburants qui sont supposés être parfaitement substituables. D'où q_c , la production totale d'énergie, est de la forme : $q_c = x + L_e$. x est la quantité consommée de pétrole et c_x est le coût d'approvisionnement d'un gallon de pétrole.

L'utilité générée par la consommation du bien alimentaire (indiqué a) et du carburant (indiqué c) est notée U . Elle est additive et donnée par : $U = u_a + u_c$. On suppose que u_f avec $f \in \{a, c\}$ est de classe C^2 , strictement croissante et strictement convexe et satisfait les conditions d'Inada :

$\lim_{q_f \rightarrow 0} u'_f(q_f) = +\infty$ où $u'_f(q_f) = \frac{du_f}{dq_f}$. On note p_i la fonction de surplus marginal et d_i son

inverse, c'est-à-dire, $d_f(p_f) \equiv p_f^{-1}(q_f) \equiv u'_f(p_f)$.

Enfin, seul le pétrole pollue, les biocarburants sont neutres en carbone.⁸ On suppose que pour chaque unité de pétrole consommé, une tonne équivalent carbone est émise dans l'atmosphère. x représente non seulement le niveau d'extraction du pétrole mais aussi le niveau des émissions de carbone induite par la consommation de pétrole.

On examine deux politiques. La première institue des montants minima de production des biocarburants. On note \underline{L}_e ce montant alors la contrainte s'écrit de la manière suivante : $\underline{L}_e \leq L_e$. La deuxième politique instituer un seuil sur le niveau des émissions carbone. On note \bar{x} ce seuil, la contrainte associée à cette politique s'écrit : $\bar{x} \geq x$. Le modèle théorique est exposé en détail dans l'appendice A. Au cours de cette section, nous analysons les différents cas utiles à la compréhension des simulations.

⁸ Par souci de simplicité et sans perte de généralité, nous supposons que pour chaque unité de pétrole une tonne équivalent carbone est émise dans l'atmosphère.

Examen des politiques «pro-biocarburants » et climatique.

Décrivons le fonctionnement du modèle en l'absence de toute politique. Produire de l'énergie à partir du pétrole est moins coûteux que de produire de l'énergie à partir de biocarburants ($c_x < c_e$). Au fur et à mesure que le pétrole devient plus onéreux, le prix du carburant augmente. Il devient compétitif de produire des biocarburants lorsque le coût d'approvisionnement du pétrole (c_x) est égal au coût marginal total des biocarburants $\left[\frac{1}{k_e} (c_e + \pi) \right]$ où π est la rente foncière. Dès lors, la rente de la terre est liée au coût d'approvisionnement du pétrole. La croissance du prix du pétrole induit celle de la rente de la terre π .

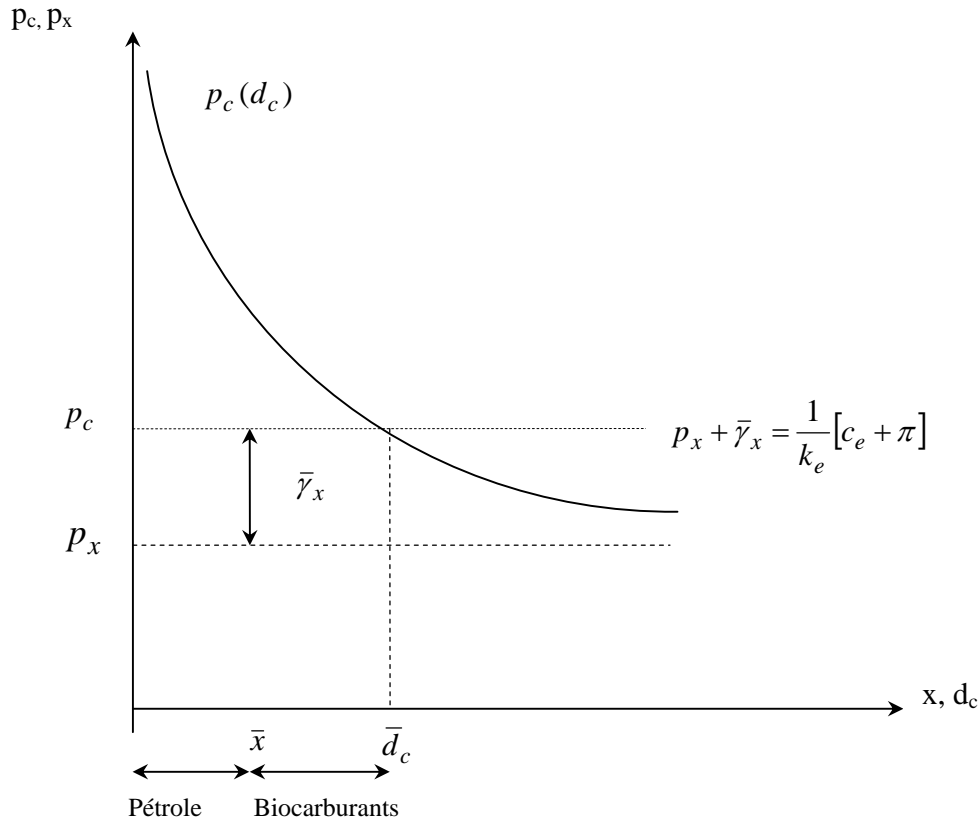
La politique «pro-biocarburants». Un niveau minimal de production des biocarburants noté \underline{L}_e doit être atteint à la date T.

A la date de l'implémentation de la politique (T), une subvention ($\underline{\gamma}_e$) va devoir combler l'écart entre le coût d'approvisionnement du pétrole et le coût marginal total de production des biocarburants, le prix de l'énergie est alors donnée par : $p_c = c_x = \left[\frac{1}{k_e} (c_e + \pi - \underline{\gamma}_e) \right]$. Au fur et à mesure que le coût d'approvisionnement du pétrole croît, la rente foncière s'élève. La subvention dont doit bénéficier la production de biocarburants diminue.

Seuil sur le niveau des émissions de carbone. Le niveau des émissions ne doit pas excéder \bar{x} .

La figure 1 représente la demande inverse de carburant et les choix énergétiques lorsque la contrainte est saturée. A partir de l'instant où ce seuil est atteint, la consommation de pétrole est bloquée à \bar{x} . Pour que le marché des biocarburants soit à l'équilibre, la différence entre le prix du carburant et le coût d'approvisionnement du pétrole doit être compensée par une taxe sur le pétrole ($\overline{\gamma}_x$). La différence entre la demande totale de carburants (\bar{d}_c) et l'approvisionnement en pétrole (\bar{x}) est fournie par les biocarburants.

Figure 1 : Demande inverse du carburant et choix énergétique (pétrole/biocarburants) lorsque la contrainte climatique est saturée.



3. MODELE EMPIRIQUE

Nous utilisons la base théorique exposée au cours de la section précédente pour développer le modèle empirique. Néanmoins, pour prendre en compte les différentes dimensions du problème, le modèle est élargi. D'une part, nous considérons un modèle à deux pays avec les deux principaux producteurs et consommateurs mondiaux d'éthanol (Etats-Unis/Brésil). D'autre part, les biocarburants de seconde génération sont introduits dans le modèle. Enfin, nous considérons

les émissions indirectes c'est-à-dire les émissions induites par la modification de l'usage du sol. Le modèle simulé est exposé en détail dans l'appendice B.

Le secteur des transports.

Trois ressources : le pétrole, l'éthanol et l'éthanol ligno-cellulosique⁹ peuvent fournir de l'énergie.

Le prix du pétrole est exogène et déterminé par la demande mondiale. Il doit augmenter de 1.17 US dollar par gallon en 2007 à 2.31 US dollars par gallon en 2025 (World Energy Outlook, IAE 2009). Néanmoins, il est spécifique à chaque pays étant donné que la taxe pétrolière diffère aux Etats-Unis et au Brésil.

Les Etats-Unis et le Brésil sont les leaders mondiaux de la production et de la consommation d'éthanol (FAO 2008).¹⁰ Alors que l'éthanol est produit à partir de maïs aux Etats-Unis, le sucre de canne est transformé en éthanol au Brésil. La spécificité du processus de production de l'éthanol est à l'origine de l'avantage comparatif du Brésil (Seauner 2008). Produire un gallon d'éthanol aux Etats-Unis coûte 1.05 US dollar alors qu'au Brésil ce même coût s'élève à 0.54 US dollar (FAO 2008).¹¹ De plus, la quantité de terre nécessaire à la production d'un gallon d'éthanol est plus faible au Brésil. En effet, 1 700 gallons d'éthanol sont produits à partir de la culture d'un hectare de terre cultivée en sucre de canne alors que la culture d'un hectare de maïs fournit 800 gallons d'éthanol (Seauner 2008). Enfin, la troisième source d'énergie est l'éthanol ligno-cellulosique (ou biocarburant de seconde génération). Il présente deux avantages comparativement à l'éthanol. Premièrement, il est produit à partir de déchets ou de ligno-cellulose et n'est pas en compétition avec la production alimentaire pour l'usage de la terre (IFP 2007). Sa faible teneur en carbone est son deuxième avantage (Farell 2006, Lasco et Khanna 2009). Nous développerons ce point plus tard au cours du paragraphe relative aux émissions de

⁹ La définition de l'éthanol ligno-cellulosique est introduite dans l'appendice C.

¹⁰ La production et la consommation de biodiesel aux Etats-Unis et au Brésil est marginale. La production de biodiesel représente 6% (resp. 1.2%) de la production totale de biocarburants de première génération aux Etats-Unis (resp. Brésil) (FAO 2008).

¹¹ Ce coût est défini hors coût d'opportunité de la terre, ce dernier étant endogène. Les différentes composantes du coût de production sont explicitées dans le glossaire de l'appendice C.

carbone. Néanmoins, l'éthanol ligno-cellulosique souffre d'un coût de production élevé qui réduit sa compétitivité. Son coût s'élève à 5 US dollars par gallon, il devrait décroître de 25% d'ici à 2025 (IAE 2009).

Alors que l'éthanol est mélangé au pétrole pour obtenir des biocarburants de type E10 ou E85,¹² l'éthanol ligno-cellulosique (ou biocarburant de seconde génération) est consommé pur (Lasco et Khanna 2009). Afin de modéliser l'imparfaite substituabilité entre le pétrole et l'éthanol, la production de carburant provenant de ces deux ressources est caractérisée par une fonction de production à élasticité constante (CES). La valeur de cette dernière reflète les barrières technologiques pour remplacer l'éthanol au pétrole. Le carburant E10 est peut-être utilisé avec tout type de véhicule. En revanche, le carburant E85 est uniquement compatible avec des véhicules dits Flexfuel (ou VCM, Véhicule à Carburant Modulable). Par conséquent, pour assurer le développement massif de l'E85, un renouvellement de la flotte des véhicules est nécessaire, ce qui constitue une barrière technologique. Alors que l'élasticité de substitution s'élève à 2 aux Etats-Unis (Lasco et Khanna 2009), elle est égale à 1.85 au Brésil (Hertel *et al.* 2009). En revanche, l'éthanol ligno-cellulosique est un substitut parfait au mélange énergétique (pétrole/éthanol).

Disponibilité en terres.

Au Brésil, la terre peut être allouée à la production alimentaire ou énergétique ou enfin aux pâturages/forêts¹³ qui sont un puits de carbone (séquestration biologique).¹⁴ Selon FAOSTAT, 197 millions d'hectares de terres brésiliennes sont allouées aux pâturages. Parmi l'espace forestier, on considère uniquement les terres ayant une valeur environnementale (séquestration du carbone) soit 197 millions d'hectares (ou 46% de l'espace forestier).¹⁵ Par conséquent, 394 millions d'hectares séquestrent du carbone (Global Forest Watch 2009). De plus, aujourd'hui, 66

¹² E10 est un carburant produit à partir de pétrole et d'éthanol, il contient 10% d'éthanol. L'E85 est également produit à partir de pétrole et d'éthanol mais contient quant à lui 85% d'éthanol.

¹³ Au cours du texte, nous parlerons indifféremment de terres marginales ou de forêts/pâturages.

¹⁴ Le processus de séquestration biologique est expliqué dans le glossaire de l'appendice C.

¹⁵ Les forêts destinées à l'exploitation forestière (107 millions d'hectares) ou protégées par des dispositions légales (125 millions d'hectares) ne sont pas introduites dans le modèle.

millions d'hectares de terre sont consacrées aux cultures végétales pour produire soit des biens alimentaires ou des biocarburants (FAOSTAT). En revanche, aux Etats-Unis, la terre peut être uniquement allouée à la production énergétique ou alimentaire. 100 millions d'hectares de terres sont mises en culture (FAOSTAT).

Le secteur agricole.

L'offre du bien agricole est représentée par une fonction de production de type Léontieff : c'est le produit du rendement et de la demande de terre. Les Etats-Unis bénéficient d'un avantage absolu dans la production agricole étant donné que leurs rendements agricoles sont plus élevés et leurs coûts de production plus faibles. Alors que le rendement des produits végétaux est de l'ordre de 4 tonnes par hectare aux Etats-Unis, le rendement moyen au Brésil s'élève à 3 tonnes par hectare.¹⁶ La croissance des rendements agricoles est exogène et n'annule pas l'avantage absolu des Etats-Unis. Enfin, étant donné que les terres de meilleure qualité sont cultivées avant celles de faible qualité, les coûts de production agricole sont convexes. La technique de calibration de ces coûts est décrite dans l'appendice B.

Les échanges bilatéraux.

La quantité de biens échangés n'est rien d'autre que la demande excédentaire dans chaque pays. En dépit de coûts de production élevés et d'un manque de terre, les Etats-Unis sont les premiers producteurs mondiaux d'éthanol. Le marché domestique américain est protégé non seulement par la présence de barrières à l'entrée (une taxe unitaire de 54 cents par gallon importé couplée à une taxe ad-valorem de 2,5%) mais aussi par une subvention à la production (une subvention de 46 cents par gallon d'éthanol mélangé au pétrole) (Ando *et al.* 2009).

¹⁶ La base de données de la FAO (FAOSTAT) définit le rendement moyen des cultures végétales. Cette donnée a été reprise dans le modèle.

Les émissions de carbone.

Nous distinguons les émissions directes de carbone des émissions indirectes. Les émissions directes dépendent des choix énergétiques (pétrole versus biocarburants). Les émissions par les biocarburants présentent deux spécificités. D'une part, le carbone est rejeté dans l'atmosphère au cours du processus de production. D'autre part, le niveau des émissions dépend du processus de fabrication. Produire un gallon d'éthanol aux Etats-Unis à partir de maïs émet 1.7 kilogramme équivalent carbone alors que la production d'un gallon d'éthanol au Brésil à partir du sucre de canne rejette uniquement 0.4 kilogramme équivalent carbone. La production d'un gallon d'éthanol ligno-cellulosique émet 0.2 kilogramme équivalent carbone (Lasco et Khanna 2009). Les émissions de carbone par le pétrole sont rejetées dans l'atmosphère au cours du processus de consommation et sont identiques dans chaque pays. Pour un gallon de pétrole consommé, 3.2 kilogrammes équivalent carbone sont émises dans l'atmosphère. Quant aux émissions indirectes de carbone, elles sont liées aux modifications endogènes d'allocation du sol. A la suite de la mise en culture des pâturages/forêt, le carbone séquestré dans la biosphère est rejeté dans l'atmosphère.

Politiques énergétiques.

On introduit deux politiques énergétiques américaines. L'une est une politique dite «pro-biocarburants». Des cibles de consommation et de production de biocarburants sont introduites dans le modèle. L'autre vise à instituer une cible de diminution des émissions de carbone. Les émissions provenant des autres secteurs de l'économie (électrique, industriel et résidentiel commercial) sont exogènes, elles sont extraites du rapport de l'Agence Américaine pour l'Environnement (EPA 2009). Pour atteindre cet objectif, les Etats-Unis peuvent mettre en œuvre deux stratégies conjointement ou individuellement. La première vise à substituer des sources d'approvisionnement énergétique intense en carbone (pétrole) par des sources moins intenses en carbone (éthanol ou éthanol ligno-cellulosique) dans le secteur des transports. La seconde vise à

adopter des technologies d'abattement dans les autres secteurs énergétiques. Le coût des technologies d'abattement¹⁷ est exogène et est égal à 40 US dollars par tonne équivalent carbone (EPA 2009).

4. SCENARIOS ET RESULTATS

On examine trois scénarios.

-*Scenario de base*. Dans ce scénario, aucune politique dite pro-biocarburants ou climatique n'est adoptée. Les données du scénario sont celles décrites au cours du paragraphe précédent.

-*Scénario « pro-biocarburants »*. La consommation et la production totale de biocarburants doit s'élever à 36 millions de gallons en 2022 et celle de biocarburants de seconde génération doit au moins être égale à 21 millions de gallons. L'objectif de ce scénario est d'analyser l'impact de cette politique sur les choix énergétiques et sur l'allocation du sol aux Etats-Unis et au Brésil ainsi que sur la modification du niveau des émissions directes et indirectes de carbone.

-*Scénario « cap sur le carbone »*. En mars 2009, l'administration Obama a évoqué une série de mesures pour lutter contre le changement climatique.¹⁸ L'une d'entre elle vise à instaurer des cibles sur le niveau de réduction des émissions de carbone : en 2020, le niveau des émissions doit être 20% inférieur à celui observé en 1990. Aux Etats-Unis, le secteur des transports est le second émetteur de carbone. A l'aide de ce scénario, nous pouvons estimer quelle sera la part du secteur des transports pour respecter cette cible.

Les choix énergétiques.

Le Tableau 1 résume les choix énergétiques en 2007, 2020 et 2022 pour l'ensemble des scénarios du modèle.

¹⁷ Les technologies d'abattement regroupe l'ensemble des stratégies permettant de substituer des énergies polluantes (pétrole, charbon) à des énergies plus économes en carbone ou neutre en carbone (énergie, nucléaire, énergie solaire).

¹⁸ Rappelons que cette mesure n'a pas encore été implémentée.

Quel que soit le scénario considéré le pétrole reste la principale source d'approvisionnement de carburant aux Etats-Unis. Malgré l'accroissement du prix du pétrole, sa part dans le mélange énergétique (pétrole/éthanol) ne diminue que très peu dans le scénario « *base* ». En 2007, il est mélangé à hauteur de 94% avec l'éthanol. En 2020, cette part est de l'ordre de 95%. En présence de politique pro-biocarburants ou climatique, la consommation de pétrole diminue par rapport au scénario sans régulation, la baisse étant plus marquée pour le scénario « *cap sur le carbone* » (voir Tableau 1). Dans le scénario « *cap sur le carbone* », le prix du pétrole ainsi que celui de l'éthanol est incrémenté du dommage causé par la pollution (ou taxe sur le carbone). Le prix du carburant augmente et déprime la demande. Dans le scénario « *pro-biocarburants* », comme nous l'avons souligné au cours du modèle théorique, les biocarburants sont subventionnés afin de combler l'écart entre le coût d'approvisionnement de l'énergie par le pétrole et par les biocarburants. De ce fait, le prix des biocarburants diminue comparativement à celui du pétrole favorisant l'adoption de ces premiers au détriment du pétrole.¹⁹

Le développement de l'éthanol aux Etats-Unis reste limité pour la totalité des scénarios. En l'absence de régulation (scénario « *base* »), la consommation d'éthanol augmente de 9 500 millions de gallons en 2007 à 9 973 millions de gallons en 2020 aux Etats-Unis (voir Tableau 1). Plusieurs facteurs expliquent la faible pénétration de l'éthanol sur le marché américain. Premièrement, les Etats-Unis ne bénéficient pas de nouvelles terres arables pour étendre la production énergétique. Tout accroissement de la production doit s'effectuer au détriment de la production agricole. Deuxièmement, les Etats-Unis pourraient accroître leur consommation en important de l'éthanol moins coûteux du Brésil. Mais, la présence de fortes barrières tarifaires ralentit le rythme des importations qui n'excèdent pas en moyenne 10% de la consommation totale de 2007 à 2025. En revanche, la consommation brésilienne d'éthanol double de 2007 à 2025 alors que celle de pétrole stagne. Le coût de production de l'éthanol au Brésil est faible, sa compétitivité comparativement au pétrole est meilleure qu'aux Etats-Unis. De plus, la terre au Brésil étant abondante, la faiblesse du coût d'opportunité de la terre ne nuit pas à sa compétitivité. Dès que l'éthanol ligno-cellulosique devient compétitif, sa contribution dans l'approvisionnement énergétique est importante. Aux Etats-Unis, l'éthanol ligno-cellulosique est

¹⁹ Comme nous le verrons dans la suite du texte, la politique « pro-biocarburants » favorise le développement des biocarburants de seconde génération au détriment des biocarburants de première génération.

adopté en 2023.²⁰ En 2025, il fournit 75% de la consommation d'énergie. Au Brésil, il est adopté en 2024, son développement est moins significatif.

Analysons à présent, l'impact de la politique «pro-biocarburants» puis celui de la politique climatique sur la consommation/production d'éthanol et d'éthanol ligno-cellulosique. En l'absence de régulation (scénario « *base* »), la consommation américaine d'éthanol atteint 10 222 millions de gallons en 2022 alors que celle de ligno-cellulosique est nulle (voir Tableau 1). Par conséquent, pour respecter la politique «pro-biocarburants », la consommation de biocarburants doit être multipliée par 3.5. Seule la consommation de ligno-cellulosique est stimulée. D'une part, sa date d'adoption est avancée. D'autre part, la consommation de ligno-cellulosique croît de 37% sur la période 2020-2025 comparativement au scénario « *base* ». Alors que la politique «pro-biocarburants» stimule le développement de l'éthanol ligno-cellulosique, sa consommation n'est pas modifiée dans le scénario «*cap sur le carbone*» comparativement au scénario de «*base*». Dans le scénario «*cap sur le carbone*», les prix du pétrole et de l'éthanol augmentent comparativement au scénario de «*base*» entraînant une augmentation du prix des carburants et un ralentissement de la demande. Pour finir, la demande d'éthanol diminue également (voir Tableau 1).

²⁰ La date d'adoption est relativement tardive étant donné que le coût initial de production de l'éthanol ligno-cellulosique est issu du scénario «pessimiste» des projections de l'Agence Internationale de l'Energie (IAE 2009).

Tableau 1: Consommation des différentes ressources aux Etats-Unis dans les différents scénarios

Scénario		Scenario de base	Scénario «pro-biocarburants »	Scénario « cap sur le carbone »
Consommation (Millions de gallon)				
Pétrole	2007	148 615	148 615	148 615
	2020	147 145	140 828	130 744
	2022	146 933	139 915	129 676
Ethanol	2007	9 776	9 776	9 776
	2020	9 973	9 532	9 221
	2022	10 222	9 741	9 040
Ethanol ligno-cellulosique	Date d'adoption	2023	2020	2023
	2025	91 650	91 650	91 650

Allocation du sol et secteur agricole.

Aux Etats-Unis et pour l'ensemble des scénarios, la superficie des terres agricoles décroît au profit des terres allouées à la production énergétique jusqu'à la date de développement de l'éthanol ligno-cellulosique (2024). Les Etats-Unis sont exportateurs nets de produits agricoles jusqu'en 2014. Puis de 2014 à 2025, par manque de terres disponibles, ils importent des produits agricoles du Brésil. Pour répondre à la demande agricole extérieure, les forêts/pâturages brésiliens sont convertis en terres agricoles. Ceci aura des répercussions sur les émissions indirectes de carbone comme nous le verrons au cours du prochain paragraphe.

En revanche, au Brésil la superficie des terres agricoles ne diminue pas quel que soit le scénario considéré. En effet, tout accroissement des productions agricole et énergétique est réalisé via la conversion des terres marginales (pâturages/forêts). Dans le scénario «*base*», la superficie des terres marginales diminue de 80 millions d'hectares. Par conséquent, 21% de la forêt brésilienne disparaissent. Ceci aura des répercussions sur les émissions indirectes de carbone.

Les émissions de carbone.

Alors que les émissions directes de carbone sont liées aux choix énergétiques, les émissions indirectes de carbone sont quant à elles déterminées par les choix d'allocation du sol au Brésil.

En l'absence de toute régulation, les émissions cumulées directes provenant du secteur des transports augmentent de 91% de 2007 à 2025 aux Etats-Unis. Les politiques examinées diminuent les émissions de carbone domestiques dans le secteur des transports avec une faible intensité. La diminution des émissions directes par rapport au scénario «*base*» est insignifiante dans le scénario «*pro-biocarburants*». En effet, de 2020 à 2025, période au cours de laquelle la politique «*pro-biocarburants*» est effective, les émissions cumulées directes de carbone diminuent uniquement de 1%. En revanche, les émissions cumulées totales de carbone²¹ décroissent de 44% dans le scénario «*cap sur le carbone*». Toutefois, force est de souligner que la part du secteur des transports dans la réduction des émissions n'excède pas 1%. En effet, les émissions directes de carbone dans le secteur des transports décroissent de 2% par rapport au scénario «*base*». La politique climatique américaine accroît les émissions indirectes de carbone au Brésil. Pour respecter la cible de réduction d'émissions, les Etats-Unis accroissent leurs importations d'éthanol comparativement au scénario «*base*». En effet, le carbone est relâché par les biocarburants au cours du processus de production. Dans le scénario «*cap sur le carbone*», 4.67 millions d'hectares supplémentaires comparativement au scénario de «*base*» sont mises en

²¹ Il s'agit de l'ensemble des émissions de carbone hors émissions liées à la modification de l'usage du sol.

culture relâchant 65 millions supplémentaires de tonnes équivalent carbone. De ce fait, les émissions cumulées de carbone au Brésil augmentent de 5%.

Coût de l'implémentation chaque politique.

D'une part, on peut calculer la subvention qui devra être accordée pour implémenter la politique « pro-biocarburants » aux Etats-Unis. Cette subvention diminue de 1.1 US \$ par gallon en 2022 à 0.97 US \$ en 2025. Si nous comparons, à présent, cette subvention au coût de production de l'éthanol ligno-cellulosique, elle représente de 50% à 33% du coût total de production. D'autre part, on peut estimer la taxe sur le carbone dans le secteur des transports qui devrait être de l'ordre de 120 US \$ par tonne d'équivalent carbone. Par conséquent, le prix du pétrole devrait être augmenté de 0.38 US \$ par gallon et celui de l'éthanol de 0.204 US \$ par gallon. Alors que le secteur des transports émet environ 30% des émissions cumulées de carbone de 2007 à 2025, sa part dans la réduction des émissions de carbone est de l'ordre de 1%. Afin de respecter la cible de réduction des émissions de carbone, les émissions cumulées américaines doivent diminuer de 11 590 millions de tonnes équivalent carbone. Pour un coût d'abattement de 40 US dollar par tonne équivalent carbone dans les autres secteurs énergétiques, la réduction des émissions dans le secteur des transports est de l'ordre de 65 millions de tonnes équivalent carbone.

5. CONCLUSION

On a développé un modèle à deux pays (Etats-Unis/Brésil) afin d'analyser l'impact de deux politiques américaines (politique « pro-biocarburants » sur les biocarburants et politique de cap sur le carbone). On a focalisé notre analyse sur trois points. Premièrement, nous avons exploré les substitutions endogènes entre différentes ressources (pétrole, éthanol et éthanol ligno-cellulosique). La politique «pro-biocarburants» favorise le développement de l'éthanol ligno-cellulosique. Toutefois, pour atteindre cette cible de production/consommation, l'éthanol

cellulosique devrait être subventionné à hauteur de 50% à 33% de son coût de production, la valeur de la subvention variant de 1.10 US dollar par gallon à 0.97 US dollar. En revanche, la politique de cap sur le carbone induit une augmentation du prix des carburants déprimant leur consommation. En effet, cette politique accroît le prix des ressources polluantes (pétrole et éthanol) en fonction de leur intensité en carbone. Aux Etats-Unis, la taxe endogène sur le carbone imposée à la consommation de pétrole devrait être de 0.38 US dollar alors que la taxe sur le carbone imposée à la production d'éthanol devrait être de 0.204 US dollar par gallon. Deuxièmement, cette étude explore les effets de ces politiques sur les émissions directes de carbone aux Etats-Unis. La politique « pro-biocarburants » a un effet insignifiant sur la diminution des émissions de carbone. La part du secteur des transports pour atteindre la cible de réduction du niveau des émissions est très faible, une large part de la diminution des émissions provenant des autres secteurs de l'économie. Troisièmement, elle examine les effets en retour de ces politiques sur le marché de la terre et les émissions indirectes de carbone au Brésil : pays disposant de vastes territoires disponibles pour étendre la production de biocarburants.

Cette étude pourrait bénéficier de plusieurs extensions. D'une part, nous pourrions compléter l'étude en analysant l'impact du retrait des barrières à l'entrée sur le marché de l'éthanol américain. D'autre part, certaines études envisagent la conversion des terres américaines protégées par le «Conservative Reserve Program» en terres agricoles pour accélérer le développement des biocarburants. Nous pourrions introduire cette possible conversion dans notre étude et comptabiliser les émissions indirectes de carbone.

6. BIBLIOGRAPHIE

Ando A.W, M. Khanna, and F. Taheripour, 2009, Market and Social Welfare Effects of the Renewable Fuels Standard, Forthcoming, *Handbook of Biocarburants Economics and Policy*, ed. M Khanna, J Scheffran, D Zilberman. New York: Springer. In press.

Banque Mondiale, Données et Recherches, URL:
<http://www.banquemondiale.org/donnees/donnees.htm>

Bomb C, K. McCormick, E. Deuwaarder and T. Kåberger, 2007, Bio-fuels for transport in Europe: Lessons from Germany and the U.K. *Energy Policy*, 35, 2256-2267.

Chakravorty U., J. Roumasset et K.P. Tse, 1997, Endogenous Substitution of Energy Resources and Global Warming. *Journal of Political Economy*, 105 (6).

Chakravorty U, Magné B, Moreaux M. 2008. *A dynamic model of food and clean energy*. *Journal of Economic Dynamics and Control* 32:1181–203

Chakravorty U, B. Magné and M. Moreaux, 2009, Can Nuclear Power Supply Clean Energy in the Long Term? A Model with Endogenous Substitution of Resources, Working Paper University of Alberta.

de Gorter, H, D.R Just, 2009, The Welfare Economics of Biocarburants Tax Credits and Mandates, *Forthcoming*, Handbook of Biofuels Economics and Policy, ed. M Khanna, J Scheffran, D Zilberman. New York: Springer. In press.

DOE, 2008, Clean Cities Alternatives Fuel Price Report. Energy Efficiency and Renewable Energy, US Department of Energy. URL : http://www.afdc.energy.gov/afdc/price_report.html.

Elobeid A, Tokgoz S. 2008. *Removing distortions in the U.S ethanol market: What does it imply for the United States and Brazil?* *American Journal of Agricultural Economics*. 90(4):918–33

ERS/USDA, 2009, *International Food Consumption Patterns*, Data Set, Economic Research Service, United-States Department of Agriculture.
Disponible en ligne : <http://www.ers.usda.gov/Data/InternationalFoodDemand/>.

EPA, 2009, *2009 U.S. Greenhouse Gas Inventory Report*, Environmental Protection Agency Report, URL : <http://epa.gov/climatechange/emissions/usinventoryreport.html>

FAO, 2008, *The State of Food and Agriculture. Bio-fuels: Risks, Prospects and Perspectives*, Food and Agricultural Organization, Rome.

FAO, *FAOSTAT*, Food and Agriculture Organization of the United-Nations, Rome, URL : <http://faostat.fao.org/>.

Farrell, A., Plevin, R., Turner, B., Jones, A., O'Hare, M., Kammen, D., 2006. Ethanol Can Contribute to Energy and Environmental Goals. *Science* 311:506-08.

Fargione J., J. Hill, D. Tillman, S. Polasky and P. Hawthorne, 2008, Land Clearing and the Bio-fuels Carbon Debt, *Science*, 319: 1235-1238.

Global Forest Watch, 2008, Brazil's Forest in brief, Global Watch Institute. URL : <http://www.globalforestwatch.org/english/brazil/forests.htm>.

GTAP 5-4, Data Package Documentation, University of Purdue.

Howitt, R.E. 1995, Positive Mathematical Programming, *American Journal of Agricultural Economics*, Vol 77, N°2, p 337-342.

IAE, 2009. *World Energy Outlook*, International Energy Agency, Paris, France.

IAE *Energy Balance*, International Energy Agency, Paris, France. URL : <http://www.iea.org/Textbase/stats/index.asp>.

IAE, 2006. *World Energy Outlook*, International Energy Agency, Paris, France.

IFP, 2007, Les biocarburants dans le monde, Panorama 2007, Proceedings. Institut Français du Pétrole, URL : <http://www.ifp.fr/actualites/dossiers/les-biocarburants>.

UNDP. 2004. World Population in 2300. United Nations Division for Population, New-York. URL: <http://www.un.org/esa/population/publications/longrange2/longrange2.htm>

Khanna, M., 2008, Cellulosic Biofuels: Are They Economically Viable and Environmentally Sustainable? *Choices*, 3rd Quarter 23(3), 16-21.

Kojima M., D. Mitchell, W. Ward, 2007, *Considering Trade Policy for Liquid Biofuels*. World Bank, Energy System Management Assistance Program.

Lasco C, Khanna M. 2009. US-Brazil trade in biofuels: determinants, constraints and implications for trade policy. In *Handbook of Biofuels Economics and Policy*, ed. M Khanna, J Scheffran, D Zilberman. New York: Springer. In press.

Lubowski R.N, A. Plantinga and R. Stavins, 2006, Land-use change and carbon sinks: Econometric estimation of the carbon supply function, *Journal of environmental economics and management*, 51, 135-152.

Peña N. 2008. *Biofuels for transportation: a climate perspective*. Solut. White Pap., Pew Center on Climate Change.

Searchinger T, R. Heimlich, R.A Houghton, F. Dong, J. Elobeid, J. Fabiosa, S. Togkoz, D. Hayes and T-H Yu, Use of U.S Croplands for Bio-fuels Increases Greenhouse Gas Through Emissions from Land-Use Change. *Science*, 319: 1238-1240.

Senauer B., 2008, Food Market Effects of a Global Resource Shift Towards Bioenergy. *American Journal of Agricultural Economics*, 90 (5), 1226-1232.

Van Kooten, C.G and H. Folmer. 2004, *Land and Forest Economics*, Cheltenham, UK: Edward Elgar.

Yacobucci B.D and R. Schnepf, 2007, *Ethanol and Bio-fuels: Agriculture, Infrastructure, and Market Constraints Related to Expanded Production*, Congressional Research Service.

Appendice A. Fondements théoriques

Le problème du planificateur social est le problème (P) suivant :

$$(P) \max_{x, L_a, L_e} \int_0^T \left\{ u_a(k_a(t)L_a(t)) + u_c(x(t) + k_e(t)L_e(t)) - c_x(t)x(t) - c_a(t)L_a(t) - c_e(t)L_e(t) \right\} e^{-rt} dt \quad (A.1)$$

sous les contraintes :

$$\bar{L}(t) - L_a(t) - L_e(t) \geq 0 \quad (A.2)$$

$$L_e(t) \geq 0 \quad (A.3)$$

$$x(t) \geq 0. \quad (A.4)$$

Sous la condition d'Inada $\lim_{q_a \downarrow 0} u'_a(q_a) = +\infty$, on doit avoir $L_a(t) > 0$, $t \geq 0$. Pour cette raison on omet la contrainte $L_a(t) \geq 0$ toujours trivialement vérifiée.

Puisqu'il n'y a pas de variable d'état dans ce problème, sa solution est la suite des solutions des problèmes indépendants en x , L_a et L_e , qui à chaque instant t ont pour fonction d'objectif la fonction qui apparaît sous le signe somme de la fonction d'objectif (A.1) et pour contraintes, les contraintes (A.2)-(A.4).

Le Lagrangien du problème à résoudre à la date t a pour expression :

$$\begin{aligned} \mathcal{L} = & u_a(k_a(t)L_a(t)) + u_c(x(t) + k_e(t)L_e(t)) - c_x(t)x(t) - c_a(t)L_a(t) - c_e(t)L_e(t) \\ & + \pi(t)[\bar{L}(t) - L_a(t) - L_e(t)] + \gamma_e(t)L_e(t) + \gamma_x(t)x(t) \end{aligned}$$

Le multiplicateur $\pi(t)$ est la valeur imputée marginale de la terre, ici égale à la valeur moyenne puisque les terres sont toutes supposées également productives, c'est-à-dire la rente foncière.

Les conditions de premier ordre sont :

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial L_a} = 0 \Rightarrow u'_a(k_a(t)L_a(t)) = \frac{1}{k_a(t)}[c_a(t) + \pi(t)] \quad (A.5)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial L_e} = 0 \Rightarrow u'_c(x(t) + k_e(t)L_e(t)) = \frac{1}{k_e(t)}[c_e(t) + \pi(t) - \gamma_e(t)] \quad (A.6)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial x} = 0 \Rightarrow u'_e(x(t) + k_e(t)L_e(t)) = c_x(t) - \gamma_x(t), \quad (\text{A.7})$$

avec les conditions d'écarts complémentaires habituelles :

$$\pi(t) \geq 0, \quad \bar{L}(t) - L_a(t) - L_e(t) \geq 0 \quad \text{et} \quad \pi(t)[\bar{L}(t) - L_a(t) - L_e(t)] = 0 \quad (\text{A.8})$$

$$\gamma_e(t) \geq 0, \quad L_e(t) \geq 0 \quad \text{et} \quad \gamma_e(t)L_e(t) = 0 \quad (\text{A.9})$$

$$\gamma_x(t) \geq 0, \quad x(t) \geq 0 \quad \text{et} \quad \gamma_x(t)x(t) = 0 \quad (\text{A.10})$$

L'interprétation de ces conditions d'optimalité est assez immédiate.

A chaque instant t :

- le surplus marginal brut de la consommation alimentaire est égal à son coût marginal de production $\frac{1}{k_a(t)} c_a(t)$, augmenté de la rente foncière de la surface qu'il faut dédier à la culture de ce bien pour en produire une unité, $\frac{1}{k_a(t)} \pi(t)$;
- le surplus marginal brut de la consommation d'énergie est au moins égal au coût marginal de production du biocarburant, $\frac{1}{k_e(t)} c_e(t)$, augmenté de la rente foncière de la surface nécessaire pour produire une unité ce bien, $\frac{1}{k_e(t)} \pi(t)$; égal si une partie des terres disponibles est effectivement consacrée à la production de biocarburant.

Dans ce dernier cas, $L_e(t) > 0$, on doit avoir :

$$\pi(t) = k_a(t)u'_a(L_a(t)) - c_a(t) = k_e(t)u'_e(x(t) + L_e(t)) - c_e(t). \quad (\text{A.11})$$

La rente foncière doit être la même sur toute terre, quelle qu'en soit l'affectation.

- Enfin le surplus marginal brut de la consommation d'énergie doit être au moins égal au coût marginal du carburant fossile ; égal si ce carburant est effectivement utilisé.

Dans ce dernier cas, $x(t) > 0$, et lorsqu'au même instant une partie du combustible est fournie par les biocarburants, $L_e(t) > 0$, on doit avoir :

$$\pi(t) = k_e(t)c_x(t) - c_e(t). \quad (\text{A.12})$$

La rente foncière est alors égale à la différence entre le coût du biocarburant produit par unité de surface, $k_e(t)$, évalué au prix du carburant d'origine pétrolière $c_x(t)$, et le coût d'exploitation de cette unité de surface lorsqu'elle est affectée à la production de biocarburant. $k_e(t)c_x(t)$ est le coût que la société devrait consentir à la marge pour obtenir $k_e(t)$ unités de carburant d'origine pétrolière si ces $k_e(t)$ unités n'étaient pas produites sous forme de biocarburant. C'est donc le coût marginal d'opportunité de la terre dédiée à cette production. La rente foncière apparaît alors comme la différence entre ce coût marginal d'opportunité et le coût marginal d'exploitation de la terre allouée à la production du dit biocarburant, $c_x(t)$.

La politique pro-biocarburant

Une politique pro-biocarburant impose une production minimale de ce type de combustible à la date t . Compte tenu de la productivité de la terre en biocarburant, $k_e(t)$, cette politique revient à contraindre l'allocation de la terre c'est-à-dire à imposer une surface minimale dédiée à la production du dit bien. Soit $\underline{L}_e(t)$, $0 < \underline{L}_e(t) < \bar{L}(t)$, cette surface minimale. Il faut alors substituer la contrainte (A.13) suivante à la contrainte (A.3) dans le problème (P) :

$$L_e(t) - \underline{L}_e(t) \geq 0. \quad (\text{A.13})$$

Notons $\underline{\gamma}_e(t)$ le multiplicateur associé à cette contrainte.

La condition de premier ordre (A.4) relative à L_e devient la condition (A.14) suivante :

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial L_e} = 0 \Rightarrow u'_c(x(t) + k_e(t)L_e(t)) = \frac{1}{k_e(t)} [c_e(t) + \pi(t) - \underline{\gamma}_e(t)], \quad (\text{A.14})$$

et la condition d'écart complémentaire (A.15) doit être substituée à la condition (A.9) :

$$\underline{\gamma}_e(t) \geq 0, \quad L_e(t) - \underline{L}_e(t) \geq 0 \quad \text{et} \quad \underline{\gamma}_e(t) [L_e(t) - \underline{L}_e(t)] = 0 \quad (\text{A.15})$$

Dans la mesure où la politique est effective la contrainte (A.14) est saturée, $L_e(t) - \underline{L}_e(t) = 0$, et le multiplicateur $\underline{\gamma}_e(t)$ s'interprète comme la subvention unitaire dont il faut faire bénéficier la culture des biocarburants. Par subvention unitaire il faut comprendre la subvention par unité de surface dédiée à la production de ce bien. La subvention par unité de biocarburant s'élève alors à $\frac{1}{k_e(t)} \underline{\gamma}_e(t)$.

La politique climatique

Une politique climatique restreint l'emploi du carburant fossile pour contenir les rejets de gaz à effet de serre dans l'atmosphère.

Soit $\bar{x}(t)$ le plafond imposé à la date t , $\bar{x}(t) > 0$. Il faut alors adjoindre la contrainte (A.16) à l'ensemble des contraintes du problème (P) :

$$\bar{x}(t) - x(t) \geq 0. \quad (\text{A.16})$$

Soit $\bar{\gamma}_x(t)$ le multiplicateur associé à cette contrainte. La condition de premier ordre (A.7) relative à x devient maintenant la condition (A.17) :

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial x} = 0 \Rightarrow u'_c(x(t) + k_e(t)L_e(t)) = c_x + \bar{\gamma}_x(t) - \gamma_x(t), \quad (\text{A.17})$$

et la condition d'écart complémentaire correspondante est la condition (A.18) :

$$\bar{\gamma}_x(t) \geq 0, \quad \bar{x}(t) - x(t) \geq 0 \quad \text{et} \quad \bar{\gamma}_x(t) [\bar{x}(t) - x(t)] = 0 \quad (\text{A.18})$$

Lorsque la politique est effective la contrainte (A.17) est saturée. Puisqu'alors $x(t) = \bar{x}(t) > 0$, et donc $\gamma_x(t) = 0$ d'après (A.10).

Dans ce cas $\bar{\gamma}_x(t)$ s'interprète comme la taxe unitaire dont il faut frapper l'usage du carburant fossile.

Le modèle empirique est un modèle un peu plus complexe.

En premier lieu les fonctions de surplus marginal brut u_f , $f \in \{a, c\}$, sont des fonctions de la forme $u_f(q_f, Y^i(t))$ où $Y^i(t)$ est le produit national du pays i dont l'évolution est exogène (cf. Appendice B pour les détails).

En second lieu, pour ce qui concerne le Brésil on modélise explicitement les réserves de terre non encore affectées à la production des biens agricoles. Il en résulte que le problème (P) devient de ce fait un véritable problème dynamique de commande optimale. L'analyse détaillée de ce modèle dont l'exposé déborderait largement le cadre de cet article, est disponible sur demande auprès des auteurs.

Appendice B. Les composantes du modèle simulé

L'année de calibration du modèle est 2007 et les projections sont réalisées pour la période 2007-2025. Pour simplifier, on omet l'indice du temps. Dans ce qui suit $i, i \in \{b, us\}$, est l'indice du pays et $f, f \in \{a, c\}$, est l'indice du bien.

Fonctions de demande

La fonction de demande de chaque bien f , $f = \{a, c\}$, du pays $i, i \in \{b, us\}$, ou fonction de surplus marginal brut, est de type Cobb-Douglas :

$$d_f^i = B_f^i (p_f^i)^{\alpha_f^i} (y^i)^{\beta_f^i} N^i,$$

où d_f^i est la consommation du produit f dans le pays i , p_f^i est le prix du bien en question, y^i est le revenu par tête du pays et N^i sa population. α_f^i est l'élasticité-prix de la demande et β_f^i son élasticité-revenu. B_f^i est un paramètre de spécificité de la demande du bien f dans le pays i .

Les projections démographiques sont celles de la Division des Nations-Unies pour la Population (UNDP 2004). La population aux Etats-Unis devrait croître de 305 millions en 2007 à 315 millions en 2025. La population au Brésil devrait augmenter à un rythme plus soutenu, de 180 millions de personnes à 194 en 2025. Le revenu par tête de chaque pays croît à un taux exogène progressivement amorti. Le revenu par tête augmente au taux annuel de 1.5% aux Etats-Unis en 2007 puis décroît jusqu'à 0.7% en 2025. Le revenu par tête du Brésil, augmente de 3.5% par an en 2007 pour descendre à 2% en 2025.

Tableau 1.A: Valeurs initiales des paramètres utilisés pour la calibration de fonctions de demande du bien alimentaire agrégé et de carburant au Brésil et aux Etats-Unis

		Brésil		Etats-Unis	
		Valeur	Source de données	Valeur	Source de données
Bien alimentaire	Prix (US\$/tonne)	150	FAOSTAT	150	FAOSTAT
	Consommation (millions tonne)	34.56	FAOSTAT	76.25	FAOSTAT
	Elasticité-prix directe	-0.14	GTAP	-0.01	GTAP
	Elasticité-revenu	0.41	GTAP	0.10	GTAP
Carburant	Prix (US\$/gallon)	3.00	DOE 2008	3.04	DOE 2008
	Consommation (millions gallons)	16 678	IAE Energy Balance	168 725	IAE Energy Balance
	Elasticité-prix directe	-0.50	Chakravorty <i>et al.</i> 2009	-0.50	Chakravorty <i>et al.</i> 2009
	Elasticité-revenu	1.65	Chakravorty <i>et al.</i> 2009	1.45	Chakravorty <i>et al.</i> 2009
	Revenu par tête (US \$/tête/an)	10 720	Banque Mondiale	40 000	Banque Mondiale
	Population (millions d'individu)	180	FAOSTAT	305	FAOSTAT

Les disponibilités en terres et leurs productivités

Chaque pays dispose d'une superficie de terre notée \bar{L}^i . Dans chaque pays, la terre peut être allouée à la production énergétique ou à la production alimentaire. Ces superficies sont notées L_a^i et L_e^i . Au Brésil, une partie des terres est encore non exploitée, ni pour la production de bien alimentaire, ni pour la production de biocarburants. Ces terres retiennent du carbone qui est relâché lorsqu'on les convertit en terres agricoles quelle que soit la spéculation à laquelle elles sont destinées. On suppose que la relaxation du carbone à laquelle cette conversion donne lieu est lissée dans le temps. Notons $L_s^b(t)$ cette partie des terres brésiliennes restée à l'état «naturel». La contrainte de disponibilité en terre au Brésil a donc pour expression :

$$(\bar{L}^b - L_s^b(t)) - (L_a^b(t) + L_e^b(t)) \geq 0.$$

Aux Etats-Unis, toutes les terres utiles sont supposées exploitées de telle sorte que : $\bar{L}^{us}(t) = \bar{L}^{us}$. La contrainte d'allocation du sol s'écrit donc :

$$L_a^{us}(t) + L_e^{us}(t).$$

La conversion des terres « naturelles » du Brésil en terres agricoles est d'autant plus coûteuse qu'il reste peu de terres à convertir. L'idée est qu'on convertit d'abord les terres les moins coûteuses à convertir. La formulation suivante procède donc d'une optimisation de ce processus de conversion, non explicité, que l'on résume de la façon suivante. Soit c_s le coût unitaire de conversion. Ce coût est une fonction décroissante des terres restant à convertir :

$$c_s = c_s(L_s^b),$$

on suppose que c_s est convexe.

Le secteur des transports

Pour produire le carburant, trois types de ressource peuvent être utilisées, le pétrole indicé x , l'éthanol indicé n et enfin l'éthanol ligno-cellulosique indicé l . Pour modéliser l'imparfaite substituabilité entre le pétrole et l'éthanol, la production d'énergie est déterminée par une fonction de production à élasticité de substitution constante. Les biocarburants de seconde génération sont des substituts parfaits du mélange pétrole-éthanol permettant d'obtenir l'énergie utile (Lasco et Khanna 2009). La production totale de carburant utile notée q_c^i est donc de la forme :

$$q_c^i = \lambda^i \left[\theta_x^i \cdot (x^i)^{\frac{1}{(\rho^i-1)}} + \theta_n^i \cdot (q_n^i)^{\frac{1}{(\rho^i-1)}} \right]^{\frac{\rho^i-1}{\rho^i}} + q_l^i$$

où x^i est la consommation domestique de pétrole, q_n^i est la consommation domestique d'éthanol et q_l^i est la consommation domestique d'éthanol ligno-cellulosique. ρ^i est l'élasticité de substitution entre le pétrole et l'éthanol. λ^i est un paramètre spécifique à chaque pays. Pour calibrer la fonction de production à élasticité de substitution constante, nous suivons la méthode de Rutherford (2002). Les paramètres utilisés dans le processus de calibration sont reportés dans la Tableau 2.A et les valeurs calibrées de θ_x^i , θ_n^i et λ^i sont reportés au Tableau 3.A.

Table 2.A: Données utilisées pour calibrer les fonctions q_c^i

	Etats-Unis		
		Valeurs (2007)	Sources de données
Pétrole	Consommation (millions gallons)	164 672	IAE
	Prix (US\$ par gallon)	1.52	DOE (2008)
Ethanol	Consommation (millions gallons)	6 846	FAO (2008)
	Prix (US\$ par gallon)	1.80	DOE (2008)
Carburant	Production (millions gallon)	178 672	IAE, Energy Balance
	Prix (US\$ par gallon)	3	DOE (2008)
	Brésil		
		Valeurs (2007)	Sources de données
Pétrole	Consommation (millions gallons)	16 104	IAE
	Prix (US\$ par gallon)	1.52	DOE (2008)
Ethanol	Consommation (millions gallons)	4 016	FAO (2008)
	Prix (US\$ par gallon)	1.80	DOE (2008)
Carburant	Production (millions gallon)	20 358	IAE, Energy Balance
	Prix (US\$ par gallon)	3.04	DOE (2008)

Table 3.A: Paramètres de la fonction de production

	Brésil	USA
Part du pétrole (θ_x^i)	0.80	0.96
Part de l'éthanol (θ_x^i)	0.20	0.04
Constante de la fonction (λ_i)	1.41	1.57

Les émissions directes et indirectes de carbone

Nous distinguons deux sources d'émissions de carbone : les émissions directes et les émissions indirectes.

Emissions directes. Le taux d'émission de carbone provenant de la consommation de pétrole sont identiques dans chaque pays. En revanche, les taux relatifs à la production de biocarburants sont spécifiques au végétal utilisé dans le processus de production (Peña 2008). De plus, alors que pour le pétrole le carbone est rejeté dans l'atmosphère au moment de sa consommation, la plupart des émissions de carbone induites par l'usage des biocarburants sont produites lors de leur production (Peña 2008). Notons z_x le nombre de tonnes équivalent carbone relâchées pour chaque gallon de pétrole consommé et z_n^i (respectivement z_l^i) le nombre de tonnes équivalent carbone relâchées pour toute unité de gallon d'éthanol (respectivement éthanol ligno-cellulosique) produite. Les émissions directes de carbone sont donc égales à :

$$z_x x^i + z_n^i k_n^i L_n^i + z_l^i q_l^i$$

La combustion d'un gallon de pétrole relâche 3.2 kilogrammes équivalent carbone dans l'atmosphère (Ando *et al.*, 2009). La production d'un gallon d'éthanol au Brésil relâche 0.4 kilogramme équivalent carbone et 1.7 kilogramme équivalent carbone aux Etats-Unis (Ando *et al.* 2009). Enfin, la production d'un gallon d'éthanol ligno-cellulosique relâche 0.2 kilogramme équivalent carbone dans l'atmosphère au Brésil et aux Etats-Unis (Ando *et al.* 2009).

Emissions indirectes. Le modèle tient compte des émissions de carbone induites par la conversion des terres « naturelles » en terres agricoles au Brésil.

Commerce international

Le bien alimentaire agrégé, l'éthanol et l'éthanol ligno-cellulosique font l'objet d'échanges entre les deux pays. Les exportations du bien f du pays i vers l'autre pays sont égales à l'offre excédentaire (production-consommation) du bien en question dans le pays considéré, lorsque

cette offre excédentaire est positive. Lorsque cette offre excédentaire est négative, c'est-à-dire lorsque la demande excédentaire est positive, le pays i importe le bien f .

Les échanges entre les deux pays sont freinés par des taxes dont le détail est exposé dans le corps du texte.

Appendice C : Glossaire

Biocarburants de première génération : Deux types de biocarburants de première génération sont produits et consommés : l'éthanol et le biodiesel. Le premier est produit à partir de deux grands types de cultures : celles des plantes sucrières (canne à sucre, betterave) et celles des plantes amylacées (blé, maïs). Quant au biodiesel, il provient d'huiles végétales telles que le colza, le tournesol ou l'huile palme (IFP 2007). Aujourd'hui, l'éthanol représente environ 85% de la production totale de biocarburants de première génération. Les principaux producteurs et consommateurs mondiaux sont les Etats-Unis et le Brésil (FAO 2008). La production de ces biocarburants entre en compétition avec la production alimentaire, ce qui constitue un obstacle majeur à leur développement massif.

Biocarburants de seconde génération : Les biocarburants de seconde génération constitue un groupe hétérogène. Toutefois, l'OCDE (2008) distingue trois grands types de biocarburants de deuxième génération. Le premier groupe est constitué de l'ensemble des biocarburants qui utilisent la biomasse ligno-cellulosique comme matière première. Les biocarburants produits à partir de déchets agricoles forment le second groupe. Enfin, le troisième groupe englobe l'ensemble des biocarburants non inclus dans les deux catégories précédentes (biocarburants produits à partir d'huile végétale recyclée, biocarburants produits à partir d'algues). Dans le présent article, nous avons retenu l'éthanol ligno-cellulosique appartenant au premier groupe puisque selon l'Agence Internationale de l'Energie (2009), seuls ces biocarburants seront à un stade de développement suffisamment avancé pour répondre aux impératifs de la politique « pro-biocarburants » américaine.

Coût de production des biocarburants : Il peut être décomposé en deux éléments. L'un est le coût de production de la matière première soit du végétal (maïs ou sucre de canne). Toutefois étant donné que le coût d'opportunité de la terre est une variable endogène, de coût de production est défini hors coût d'opportunité dans le présent article. Le second est le coût de transformation de la matière végétale en biocarburants.

Renewable Fuel Standard (RFS) : En 2005, l'Energy Policy Act a établi un Renewable Fuel Standard. Ce dernier prévoyait d'accroître le volume de biocarburants de 4 milliards de gallon en 2006 à 7.5 milliards de gallon en 2012. Grâce à l'octroi de subventions, cet objectif a été atteint dès 2007, année au cours de laquelle le volume de production des biocarburants s'élevait à 8 milliards de gallon. En 2007, avec la promulgation de l'Energy Independance and Security Act, les objectifs du Renewable Fuel Standard ont été révisés à la hausse. En 2022, le volume de production/consommation des biocarburants doit s'élever à 36 milliards de gallon dont 21 milliards sous forme de biocarburants de seconde génération.

Séquestration biologique : Au cours de leur processus de croissance, les plantes absorbent du carbone, ce phénomène est appelé la captation naturelle du carbone. Le pouvoir de séquestration diffère en fonction de l'usage du sol et du climat. En effet, pour une région climatique donnée, les forêts séquestrent en moyenne plus de carbone que les terres agricoles (pâturages et cultures végétales). Par conséquent, toute conversion de forêts en terres agricoles «relâche» du carbone dans l'atmosphère et participe aux émissions de gaz à effet de serre. Aujourd'hui, la part des émissions de carbone dues à la déforestation représente 20 % des émissions mondiales de carbone. Ce phénomène est significatif dans des pays à fortes étendues forestières (Brésil, Indonésie) où les émissions dues à la déforestation peuvent atteindre de 70 à 80 % des émissions totales.